DOI: 10.24850/j-tyca-2018-02-07

Artículo

Factores que afectan la producción agrícola bajo riego: cómo medirlos y estudiar su efecto

Factors that affect agricultural production under irrigation conditions: How to measure and study their effect

José L. Espinosa-Espinosa[1]

Enrique Palacios-Vélez[2]

Leonardo Tijerina-Chávez[3]

Carlos A. Ortiz-Solorio[4]

Adolfo Exebio-García[5]

Cesáreo Landeros-Sánchez[6]

[1]Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, espinosa.jose@colpos.mx

[2]Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, epalacio@colpos.mx

[3]Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, tijerina@colpos.mx

[4]Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, ortiz@colpos.mx

[5]Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, exebio@colpos.mx

[6]Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, clandero@colpos.mx

Autor para correspondencia: José L. Espinosa-Espinosa, espinosa.jose@colpos.mx

Resumen

Hay varios grupos de factores que afectan el rendimiento de los cultivos agrícolas bajo riego; entre ellos destacan los meteorológicos, los de manejo y los relativos a la variabilidad espacial de los terrenos. Los primeros pueden afectar de forma seria los rendimientos y es poco lo que puede hacerse para aminorar su efecto. Los de manejo dependen en gran parte de las decisiones que tomen los productores y de los medios que disponen para realizar sus actividades. El tercer grupo, que depende de la variabilidad espacial de los terrenos, tiene un notable efecto para los productores que rentan tierras que han sido cultivadas por otros productores o que presentan variabilidad debido a condiciones físicas del suelo y la forma en que se han manejado. En el Distrito de Riego 038 de Río Mayo, en Sonora, México, se le ha dado el seguimiento a los cultivos durante varios años mediante sensores remotos satelitales y se han podido medir los efectos de estos factores, así como generar recomendaciones para aminorar los impactos negativos en los rendimientos. El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados obtenidos y la manera de hacerlos del conocimiento de los productores, mediante un visor en Internet.

Palabras clave: agricultura de precisión, evapotranspiración, índices de vegetación, percepción remota, variabilidad espacial.

Abstract

Several groups of factors affect the yield of agricultural crops under irrigation, including meteorological conditions, the management of crops and land, and those related to the soil's spatial variability. The first group of factors can seriously affect crop yields and little can be done to lessen their effect. Management factors depend largely on decisions made by producers and available cultivation methods. The third group depends on the soil's spatial variability, which has a notable negative effect on crop yield in general, but mainly in the case of producers who rent several plots that have been cultivated by other producers, which vary due to the soil's physical conditions and the management practices used by former producers. In irrigation district "Río Mayo" in the state of Sonora, crops have been monitored for several years using remote satellite sensors, and it has been possible to measure the effects of these factors and generate recommendations to reduce the negative impacts on yields. The objective of this work is to show the results obtained and the way of making them known to the producers through available Internet viewers.

Keywords: Precision agriculture, evapotranspiration, vegetation indices, remote sensing, spatial variability.

Fecha de recibido: 30/01/2017

Fecha de aceptado: 02/11/2017

Introducción

En el proceso de la producción agrícola, con especial énfasis en la que está bajo riego, varios factores afectan su rendimiento, entre los cuales se pueden mencionar tres grupos que impactan la producción y los rendimientos de los cultivos.

El primer grupo lo constituyen los factores meteorológicos, como las heladas, lluvias torrenciales, cambios en las temperaturas, ciclones, etcétera; sin embargo, es muy difícil controlarlos y en la mayoría de los casos no es posible hacerlo; no obstante, se puede medir su efecto y estimar las posibles afectaciones, así como llevar a cabo algunas acciones para aminorar su impacto negativo.

Las estaciones meteorológicas automáticas son dispositivos con sensores que tienen la capacidad de registrar y recolectar datos de las variables ambientales, miden los principales factores que afectan la productividad de los cultivos, también incluyen un *software* para realizar cálculos automáticos que procesan la información y la vuelven disponible para el productor agrícola. Entre la información que proporcionan son de mucho interés las temperaturas máximas y mínimas, la precipitación y la evapotranspiración de referencia a nivel diario. En el Distrito de Riego Río Mayo se tiene una parte de la Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (REMAS). Un par de estaciones situadas en el centroide del distrito de riego utilizan datos diarios como base de medición del efecto climático. Se pueden estimar los efectos térmicos en los cultivos y la demanda evapotranspirativa que afecta procesos como la fotosíntesis, base de la vida en el planeta.

El segundo grupo son los factores relacionados con el manejo de los cultivos y del suelo, que también son de importancia para la obtención de

buenos rendimientos. Un buen agricultor sabe cómo y cuándo llevar a cabo las actividades que le permitan lograr buenos rendimientos, sobre todo si dispone de los medios económicos y mecánicos para realizarlas. No obstante, es posible que mejore la productividad del agua y el suelo si puede monitorear sus cultivos usando tecnologías relativamente nuevas, como el uso de sensores remotos, que es una herramienta eficiente para la detección de diferencias espaciales y temporales de los factores que impactan la productividad de los cultivos y, de ser posible, su corrección. También los sensores remotos mediante el uso de satélites son una herramienta de gran importancia para medir la variabilidad espacial del suelo en el desarrollo de los cultivos, con objeto de efectuar las correcciones necesarias para aminorar esta variación y sus efectos perniciosos.

Desde 2006, el Colegio de Postgraduados (Colpos) fue invitado a unirse al proyecto "Participatory Multi-Level EO-Assisted Tools for Irrigation Water Management and Agricultural Decision-Support" (PLEIADeS), financiado por la Comisión Europea. Dentro de él, se ha dado seguimiento al desarrollo de cultivos en los distritos de riego 038 Río Mayo, 041 Río Yaqui y 051 Costa de Hermosillo, utilizando sensores remotos. En especial, en el distrito del Río Mayo se ha monitoreado el desarrollo de los cultivos mediante índices de vegetación, principalmente al cultivo del trigo, que representa alrededor de un 70% de la superficie cultivada, apoyado con la participación de productores cooperantes. En el presente trabajo se hace un resumen de los resultados obtenidos, haciendo énfasis en años recientes cuando se han observado impactos importantes, como consecuencia de cambios en el clima.

Materiales y métodos

El Distrito de Riego 038 Río Mayo se encuentra ubicado en el noroeste del país, al sur del estado de Sonora, entre las latitudes norte 26.71 y 27.25 grados y longitudes oeste 109.8 y 109.37 grados, con una superficie regable de 98 520 ha; la principal fuente de abastecimiento de agua es la presa "Adolfo Ruiz Cortines", con una capacidad del orden de los 1 100 hectómetros cúbicos, además de 130 pozos profundos.

Para darle seguimiento a los cultivos, se han utilizado principalmente imágenes de los satélites Landsat 5, 7 y 8, además de los satélites Spot 5 y 6, Deimos y RapidEye.

El distrito de riego es operado por la Sociedad de Responsabilidad Limitada (S. de R. L.), constituida por 16 módulos de riego y 11 582 usuarios registrados.

Como se ha indicado, para evaluar los aspectos meteorológicos, se utilizaron datos diarios de dos estaciones meteorológicas, SEMAY de la REMAS y Etchojoa.

El tercer grupo es la variabilidad espacial. Para el monitoreo espacial del suelo y temporal del desarrollo fenológico de los cultivos se usaron índices de vegetación, como: índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI, por sus siglas en inglés) (Rouse, Hass, Schell, & Deering, 1974) y el índice de estrés de humedad (MSI, por sus siglas en inglés) (Rock, Vugelmann, Williams, Voglemann, & Hoshizaki, 1986).

El NDVI está constituido por las reflectancias en las bandas roja e infrarroja cercana de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \qquad (1)$$

Donde *NIR*-infrarrojo cercano:

R- roja

Este índice varía entre -1 y 1. Los valores negativos por lo general se presentan donde hay agua; valores menores que 0.2 casi siempre se muestran cuando hay suelo desnudo; para la vegetación verde, usualmente se tienen valores que varían entre 0.25 hasta valores cercanos a 1 cuando la vegetación está en pleno desarrollo.

El MSI es la relación entre las bandas del infrarrojo medio y el infrarrojo cercano, como se muestra a continuación:

$$MSI = \frac{MIR}{NIR} \qquad (2)$$

Donde *MIR*- infrarrojo medio.

Los que varían de 0.25 hasta 0.5 indican que los cultivos no están estresados; conforme aumentan crece el estrés hasta llegar a 1 cuando los cultivos alcanzan el porcentaje de marchitamiento permanente.

Desde hace varios años se ha encontrado una relación lineal entre los valores del índice NDVI y el rendimiento del cultivo del trigo. Así, el Instituto Internacional para el Manejo del Agua (IWMI, por sus siglas en inglés) llevó a cabo un trabajo en la India que presentó en su Reporte 28 denominado "Performance Evaluation of the Bhakra Irrigation System, India, using Remote Sensing and GIS Techniques" (Sakthvadivel, Thiruvengadachari, Amerasinge, Bastiaanssen, & Molden, 1999), donde se encontró la relación entre el NDVI y el rendimiento del trigo, utilizando 274 parcelas de prueba y donde se presenta la gráfica y función encontrada, con lo que se clasificó la productividad de las diferentes secciones de este distrito de un millón y medio de hectáreas, que se muestra en la Figura 1.

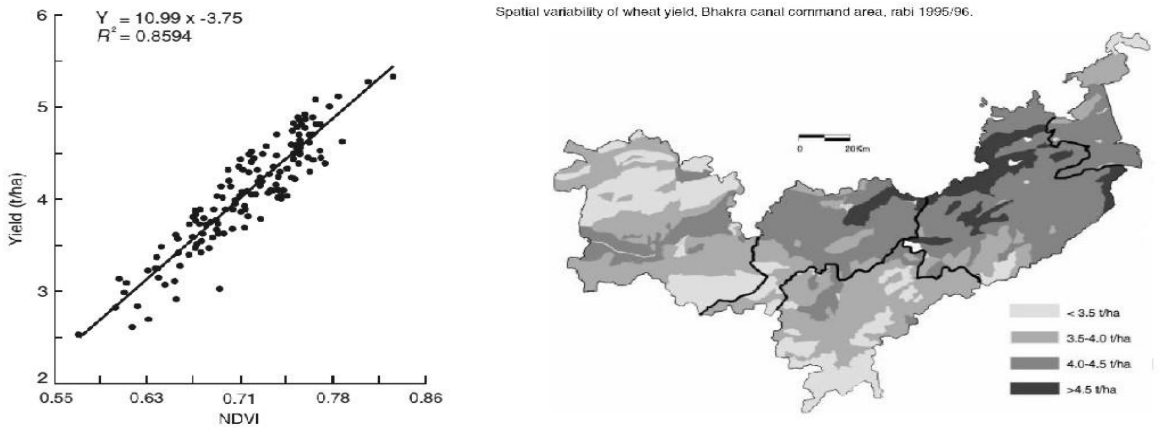

Figura 1. Función trigo y distrito de riego Bhakra.

En México se ha encontrado una relación semejante en el Distrito de Riego 038 del Río Mayo; así, en el artículo "Earth Observation as a Support to Improve Water Use in Irrigated Agriculture" (Palacios, Palacios, Rodríguez, & Palacios, 2010) se muestra una relación entre el rendimiento observado en 26 parcelas de productores de trigo y sus valores promedio del NDVI detectados durante el desarrollo de este cultivo, similar al obtenido en la India, como se muestra en la Figura 2.

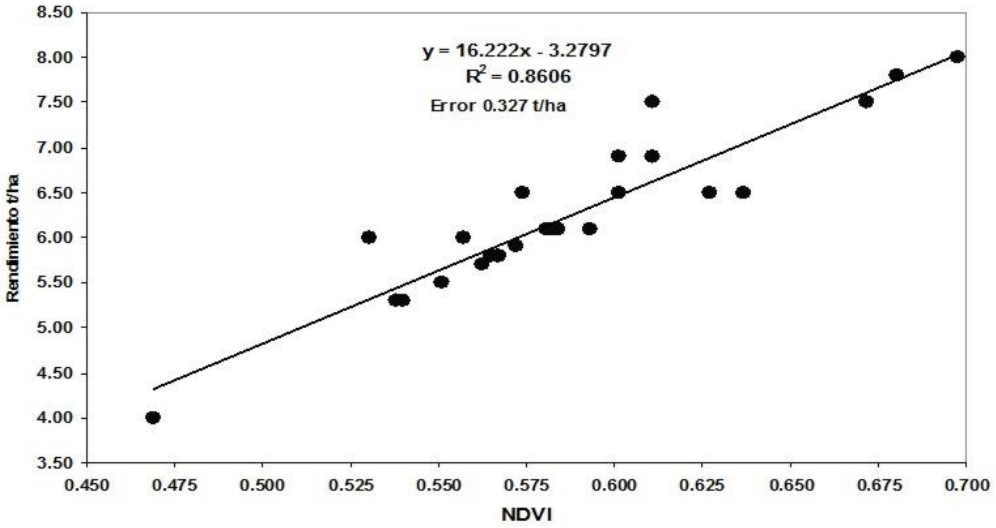

Figura 2. Relación NDVI medio con el rendimiento del trigo.

También en este artículo se muestra la forma en que se ha podido estimar la evapotranspiración del cultivo del trigo utilizando la relación *ETc* = *Kc ETr*, donde *ETc* es la evapotranspiración del cultivo, *ETr* es la evapotranspiración de referencia, que puede calcularse mediante la fórmula de Penman-Monteith y *Kc* coeficiente del cultivo, y puede estimarse en función de los valores del NDVI, como lo han demostrado varios autores, como Choudhry, Ahmed, Idso, Reginato y Daughtry (1994). Para el cultivo del trigo, Calera y González-Piqueras (2007), en particular, encontraron una relación lineal entre *Kc* y el valor del NDVI obtenido de cada imagen de los satélites Landsat, cuyo valor es:

$$Kc = 1.147\, NDVI + 1.1716 \qquad (3)$$

En el mismo artículo de Palacios y colaboradores (Palacios *et al*., 2010) se muestra una relación similar obtenida en el Distrito de Riego 038 del Río Mayo, que es:

$$Kc = 1.15\, NDVI + 0.17 \qquad (4)$$

La evapotranspiración del cultivo estimada con esta función, para cada una de las 26 parcelas, se relacionó con el rendimiento obtenido y se obtuvo una función con un ajuste estadístico bueno, como se muestra en la Figura 3.

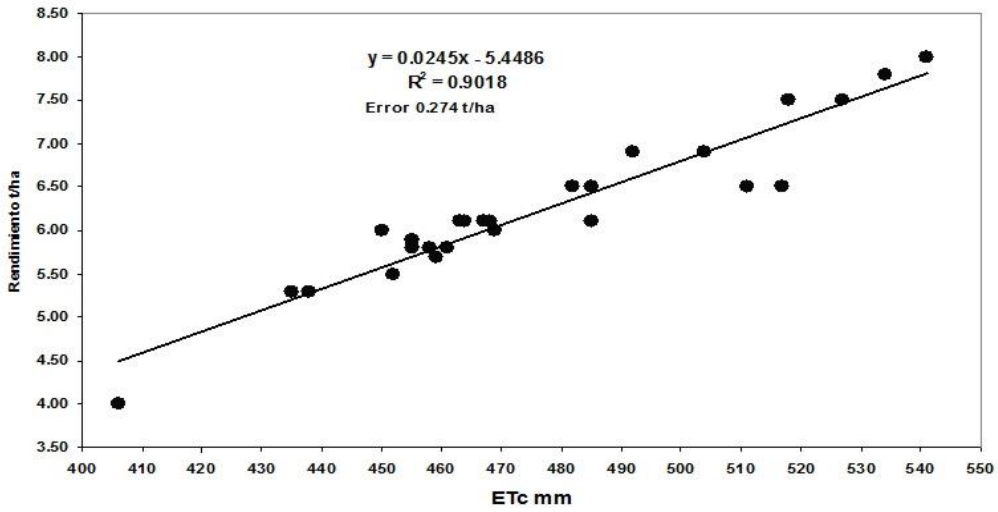

Figura 3. Relación evapotranspiración del cultivo con el rendimiento del trigo.

Finalmente, en el mencionado artículo se muestra una relación no lineal entre el MSI y el rendimiento del trigo, que es:

$$R = -18.848\, MSI^2 + 6.504\, MSI + 7.856 \qquad (5)$$

Con R^2 = 0.794 y un error estándar de 0.443 t/ha. Como es de esperarse, la función es inversa; de manera que conforme aumenta el MSI, disminuye el rendimiento. Es de mencionarse que valores cercanos a la unidad de este índice indican que las plantas han llegado al porcentaje de marchitamiento permanente.

En los años agrícolas 2013-2014 y 2014-2015 se presentaron condiciones meteorológicas poco favorables para el cultivo del trigo; las horas frío disminuyeron, sobre todo en 2014-2015, y en consecuencia las unidades calor no fueron suficientes para lograr rendimientos buenos; en este año agrícola, el rendimiento tuvo una reducción cercana a 30%, como se mostrará.

Se ha observado que los cultivos requieren ciertas cantidades de energía para lograr cada etapa de su desarrollo; estas cantidades de energía se estiman de acuerdo con los grados-día acumulados. También se ha observado que hay una relación entre la variación del índice NDVI y los grados días acumulados (Miller, Lanier, & Brandt, 2001), como se observa en la Figura 4, donde en las ordenadas se muestran los grados días acumulados (en inglés, *Growing Degree Days GDD*), y en las abscisas la variación de los índices NDVI (línea gruesa) y la relación simple:

$$Ratio = \frac{R}{NIR} \qquad (6)$$

Donde *R* y *NIR* ya fueron definidos.

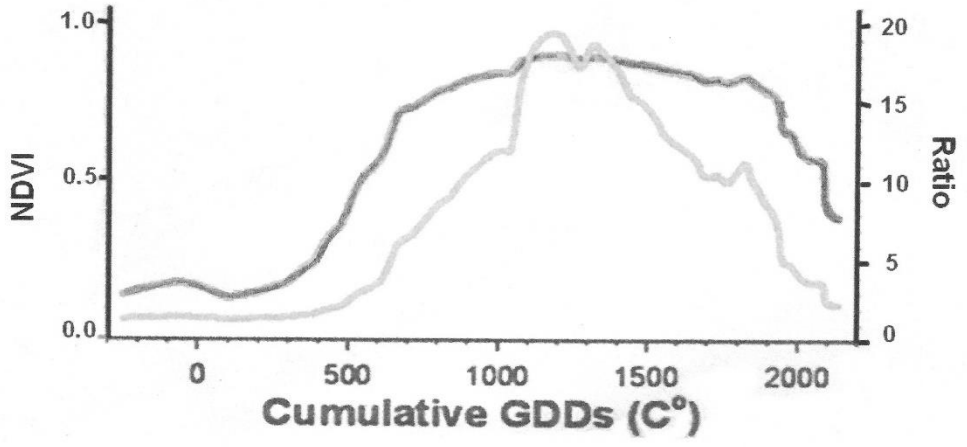

Figura 4. Relación grados día-NDVI y relación simple.

El acumulado de la curva de desarrollo del NDVI es una sigmoide, es decir, una curva en forma de una *S*, la cual se puede ajustar a una función matemática como la logística. Como ejemplo pueden verse en la Figura 5 los valores acumulados del NDVI de dos parcelas del módulo 15, donde se observa que en la parcela 9173 el valor acumulado del índice quedó abajo del de la parcela 9384; en efecto, en la primera se obtuvo un rendimiento de 6.8 t/ha de trigo y en la segunda su rendimiento fue de 7.1 t/ha. También en la Figura 5 se muestra en ambos casos en línea continua el ajuste a una función logística.

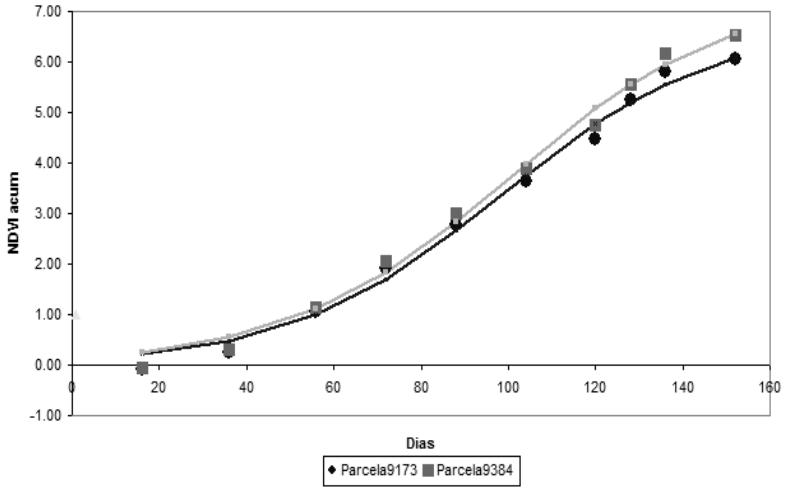

Figura 5. Valores acumulados del NDVI en dos parcelas.

Resultados y discusión

Los efectos meteorológicos

Como ya se ha indicado en los ciclos agrícolas 2013-2014 y 2014-2015, posiblemente como efectos del cambio climático, se presentaron condiciones meteorológicas poco favorables para lograr rendimientos satisfactorios, como se muestra en la Tabla 1, donde se tiene el efecto de la variabilidad climática observada en estos tres años en los rendimientos promedio del módulo 15 del distrito de riego con las unidades calor (UC) calculadas tanto totales como los días cuando se presentó el mayor valor del NDVI obtenido con las imágenes de satélite de Landsat 7 y Landsat 8.

Tabla 1. Información sobre el módulo 15.

Año	Máx NDVI	UC total	Rend. t/ha	Día Máx NDVI	UC val. máx
2013	0.89	2 331	6.91	128	1 663
2014	0.73	2 169	6.62	144	1 573
2015	0.77	1 809	5.19	96	1 180

Las unidades calor totales resultaron mayores en 2013 y existe una proporcionalidad lineal entre tales valores y los rendimientos promedio observados en este módulo; lo mismo ocurre con los valores de los índices NDVI y la unidades calor acumuladas cuando se presentó el máximo valor del NDVI (en la antesis), lo cual ocurrió a los 128 días de 2013 y a los 96 días en 2015; es decir, que debido a la falta de horas frío permitió que se adelantara un mes la antesis; obsérvese que el rendimiento disminuyó en un 25%.

Condiciones similares se presentaron en otros módulos del distrito de riego. Utilizando los datos de cinco módulos, se obtuvo una función lineal entre los valores acumulados de las unidades calor hasta el valor máximo del NDVI, que se presenta a continuación:

$$R = 0.0031 * UC + 1.518 \qquad (7)$$

Con R^2=0.919; error estándar = 0.269 t/ha.

Es evidente que es poco lo que puede hacerse para evitar los efectos negativos de carácter meteorológico; sin embargo, los productores deben estar enterados de los problemas que pueden presentarse, por lo que al desplegar la información por Internet, se advertirá con anticipación si se tiene conocimiento de falta de horas frío y en consecuencia de una menor acumulación de *UC*, lo cual podría generar que la antesis se adelante como se ha mostrado, para que se tome en consideración la posible disminución del rendimiento del cultivo del trigo o de otros cultivos de condiciones semejantes.

Los efectos del manejo

Respecto a la posibilidad de detectar problemas durante el crecimiento de los cultivos, una ayuda importante para tomar decisiones que permitan prevenir reducciones en el rendimiento será utilizar el visor (Espinosa, 2013), que está disponible en Internet, mediante el cual el productor puede apreciar cómo va el desarrollo de su cultivo al observar la coloración que genera en NDVI en las parcelas, observando por una parte la homogeneidad del crecimiento del cultivo, y el acumulado gráfico del NDVI, que puede compararse con el obtenido en el año anterior, mediante lo cual podrá tener una idea sobre el rendimiento esperado; así, como se muestra en la Figura 5, si la curva que se va generando es más baja que la del año anterior, bajo el supuesto de que se tenga un cultivo similar, se tendrá la sospecha de que algo no está bien; esto permitirá al productor buscar las razones de la reducción esperada, con objeto de corregir los posibles problemas, como se muestra en la Figura 6.

Para ver el Sistema de Monitoreo Satelital del Distrito de Riego 038 Río Mayo, hay que entrar a la página de Internet: http://hidro.colpos.mx:8080/sig-mon/

En esta página, el usuario no necesita registrarse sino poner donde se pregunta el Nombre: *demo*; el *Password*: *demo*; en tipo de usuario: *user*, y luego dar clic para entrar. Al ingresar, se despliega una lista de los números de los módulos; suponiendo que la parcela esté en el módulo

15, se busca en la lista este número y se le da un clic; en el centro de la pantalla aparecerán las parcelas de dicho módulo. Para encontrar la parcela es necesario dar el número de cuenta del padrón de usuarios o buscar la parcela por su posición dentro del módulo (Espinosa-Espinosa, Palacios-Vélez, Tijerina-Chávez, Flores-Magdaleno, & Quevedo-Nolasco, 2017).

En general, hay una presentación que se ha hecho del conocimiento de los usuarios para buscar sus parcelas, pero lo interesante es que se puede ver con detalle el estado de las parcelas por el color del índice NDVI, no solamente para la fecha más reciente de cuando ha pasado el satélite, sino que además se pueden apreciar los valores acumulados del índice en años anteriores y el avance del año actual, como se muestra en la Figura 6.

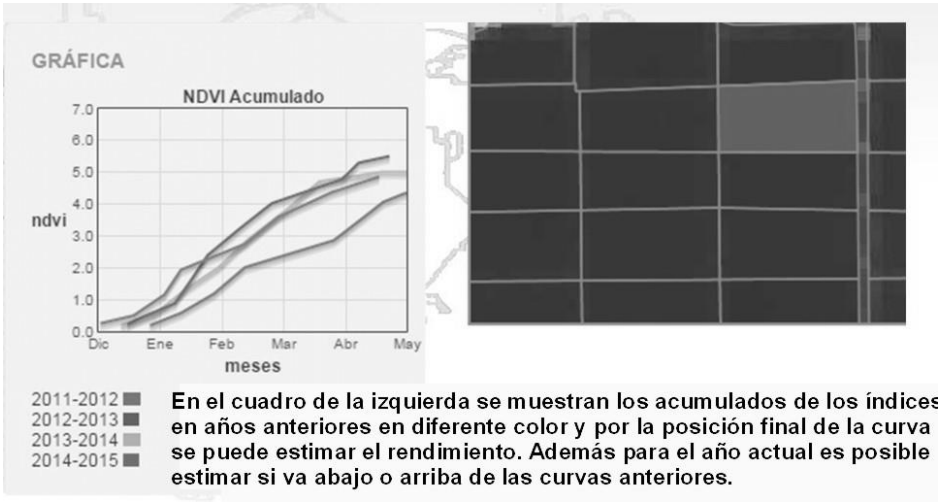

Figura 6. Visor del sistema de monitoreo.

Los efectos de la variabilidad

Otro factor que se ha estudiado ha sido el efecto de la variabilidad del suelo en el rendimiento de los cultivos, la que afecta los rendimientos, no

solamente en el trigo sino en general en todos los cultivos establecidos en el distrito de riego.

Es común que exista una variabilidad espacial en las parcelas. A veces esta variabilidad es muy significativa y por lo mismo afecta en forma negativa al rendimiento de los cultivos que se establezcan; por esta razón se ha desarrollado la denominada agricultura de precisión. Sin embargo, es factible detectar esta variabilidad mediante las imágenes satelitales, observado la variabilidad del valor de los píxeles.

Por otra parte, es muy común que en los distritos de riego de México se compren los derechos de agua de parcelas pequeñas; es decir, un productor puede rentar varias parcelas y en estos casos la variabilidad espacial puede aumentar, en especial por la variabilidad que existe en colindancia entre estas parcelas y además la variabilidad dentro de cada parcela.

Como ejemplo se presentará un caso hipotético de un lote de 27 parcelas de unas 5 ha cada una dentro del módulo de riego número 15 del Distrito de Riego 038 del Río Mayo, comprendido por más de seis mil hectáreas, donde es muy común que sus parcelas ejidales sean de 5 ha en promedio y se renten en extensiones de consideración, que en algunos casos llegan a ser del orden de mil hectáreas.

Para el ejemplo se seleccionó un lote de parcelas en la parte central del módulo y utilizando la imagen del satélite Landsat 8, correspondiente al 14 de febrero de 2016, cuando se alcanzó el mayor valor promedio del índice NDVI, se evaluó la variabilidad espacial de esta superficie sembrada con trigo.

El valor promedio del índice NDVI en las 27 parcelas fue bastante aceptable, por lo que se logró un buen rendimiento; sin embargo, podría haberse obtenido un rendimiento mayor si no se hubiera tenido la variabilidad espacial, principalmente por las regiones límite entre parcelas, como se puede observar en la Figura 7, que del lado derecho muestra las curvas de isonivel del índice NDVI. En esta misma figura se presenta una gráfica donde se señala la superficie de 140 hectáreas dividida en 19 barras, mostrando cada una de ellas el área que le corresponde. El valor promedio de NDVI de todas las barras fue de 0.877, con una desviación estándar de 0.068, por lo que su coeficiente de variación fue de 7.78%, éste es un índice de variabilidad.

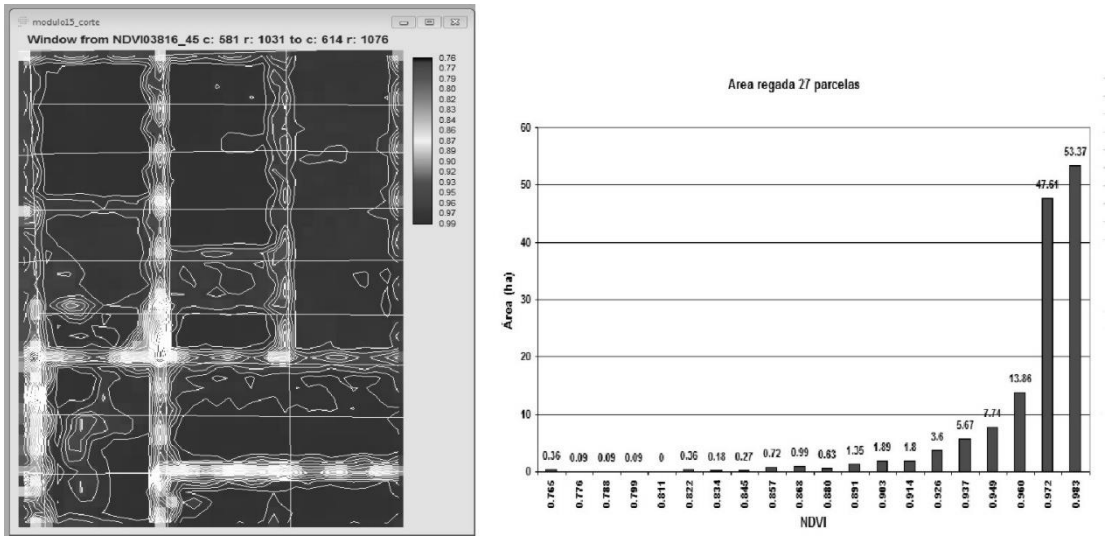

Figura 7. Variabilidad del índice NDVI en 27 parcelas.

Conclusiones y recomendaciones

De los tres grupos de factores que influyen en el rendimiento de los cultivos, los componentes meteorológicos o del clima tienen una influencia notable en los rendimientos de los cultivos; sin embargo, es poco lo que puede hacerse para modificar su efecto negativo; no obstante, el seguimiento de su evolución mediante su medición con estaciones meteorológicas automáticas permite hacer algunas previsiones para moderar sus impactos económicos y evaluar el impacto negativo en la economía del productor, con objeto de que pueda tomar decisiones anticipadas para aminorar las posibles pérdidas.

Respecto a los factores de manejo, el conocimiento del monitoreo espacial y temporal del desarrollo fenológico del cultivo mediante el NDVI y el MSI le permitirá al productor conocer las condiciones en que se encuentran mediante la visión del estado de las parcelas, consultando al visor en la página Web, por la variación de la coloración generada por los cambios del NDVI, así como la posición relativa del valor obtenido de este índice cada vez que pasan los satélites sobre el distrito de riego, y que puede compararse con la posición debida al desarrollo en años anteriores; esto

le permitirá al productor orientar sus decisiones, para tratar de mejorar, si es necesario, las condiciones del cultivo.

Una condición crítica en el desarrollo de los cultivos, generada por un estrés debido al ataque de una plaga, enfermedad o condición hídrica, se podrá notar por la posición relativa del valor del NDVI respecto a la del paso anterior del satélite, lo que permitirá llevar a cabo las acciones necesarias para tratar de aminorar los daños al cultivo.

El efecto de la variabilidad espacial tanto en una parcela como en un grupo de ellas se hace notar por el cambio del color del índice. Además, como se puede observar en la Figura 7, los efectos de orilla y de la condición diferente de algunas de las parcelas del grupo, manejado por un productor, puede afectar el futuro rendimiento del cultivo. Para aminorar este efecto, será conveniente, si la renta de las parcelas es por varios años, tratar de reducir esta variabilidad mediante varias acciones, como la nivelación de los terrenos, la aplicación diferenciada de fertilizantes y la forma de regar.

Los apoyos y recomendaciones que puede brindar el personal técnico que han contratado algunos módulos de los distritos de riego serán de mucha importancia en el asesoramiento a los productores para lograr mejores rendimientos. También este personal podrá asistirlos en el uso del visor.

Agradecimientos

Queremos agradecer al personal técnico del Distrito de Riego 038, por el apoyo que nos han dado para obtener la información sobre los rendimientos obtenidos en los módulos de riego del distrito.

Referencias

Calera, A., & González-Piqueras, J. (2007). *Parámetros biofísicos de la cubierta vegetal: relaciones operativas para obtención de mapas de estos parámetros desde las imágenes de satélite*. Ciudad Real, España: Grupo de Teledetección, Universidad Castilla La Mancha. Documento de PLEIADeS.

Choudhry, B. J., Ahmed, N. U., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Daughtry, C. S. T. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Enviroment*, 50, 1-7.

Espinosa, J. L. (2013). *Tecnologías para ofrecer servicios de asesoramiento en riegos* (tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Espinosa-Espinosa, J. L., Palacios-Vélez, E., Tijerina-Chávez, L., Flores-Magdaleno, H., & Quevedo-Nolasco, A. (enero-febrero, 2017). Sistema de monitoreo satelital para el seguimiento y desarrollo de cultivos del Distrito de Riego 038*. Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 95-104.

Miller, P., Lanier, W., & Brandt, S. (2001). *Using growing degree days to predict plant stages.pdf*. Bozeman, USA: Montana State University.

Palacios, E. V., Palacios, L. S., Rodríguez, J. C., & Palacios, J. S. (2010). Earth Observation as a Support to Impruve Water Use in Irrigated Agriculture. *Journal of Agriculture Science and Technology*, 4(6) (Serial No. 31), 1-7.

Rock, B. N., Vugelmann, J. E., Williams, D. L. W., Voglemann, A. F., & Hoshizaki, T. (1986). *Remote detection of forest damage*. *Bioscience*, 36, 439.

Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in great plains with ERTS. *Proceedings*. Third Earth Resources Technology Satellite Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 3010-317.

Sakthvadivel, R., Thiruvengadachari, S., Amerasinge, U., Bastiaanssen, W. G. M., & Molden, D. (1999). *Performance evaluation of Bhakra Irrigation System, India, using remote sensing and GIS techniques* (research report 28). Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.